

طراحی و شبیه سازی آنتن رفلکتوری پارابولیک باند Q

امید زندی^۱

امیر جعفرقلی^۲

چکیده

در این مقاله مشخصات آنتن‌های رفلکتوری پارابولیک و اصول طراحی آنها ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا هندسه رفلکتورهای پارابولیک بررسی شده و سپس با استفاده از تقریب نور هندسی معادله انتگرال تشعشعی رفلکتور به دست آمده است. با استفاده از این انتگرال میتوان داده‌های بسیاری در مورد دایرکتیویته ماکزیمم و ضرایب کارایی رفلکتورها به دست آورد. پترن رفلکتور با استفاده از تقریب انتگرال با سری دوگانه، به دست آمده است. در ادامه، الگوریتم طراحی رفلکتورهای پارابولیک ارائه شده و بر اساس آن، طراحی یک آنتن رفلکتوری به همراه فید آن در باند Q به انجام رسیده است. شبیه سازی‌های انجام شده نشان دهنده کارایی الگوریتم ارائه شده در طراحی کامل آنتن‌های رفلکتوری پارابولیک است و نتایج به دست آمده، موارد مورد انتظار در طراحی را برآورده می نماید.

کلید واژه

آنتن رفلکتوری، فید، دایرکتیویته، ضرایب کارایی، حساسیت طراحی

۱. دانشجوی دکتری برق، دانشگاه تربیت مدرس Omid_zandi@modares.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۱۹

مقدمه

آنتن‌های رفلکتوری از ترکیب یک نظام تشعشعی که خود متشکل از یک یا چند آنتن است و به عنوان فید شناخته میشود، با یک بازتاب کننده عموماً فلزی ساخته میشوند. اگر بخواهیم یک دلیل برای استفاده از این آنتن‌ها بیاوریم، آن است که رفلکتور میتواند شکل پترن یک عنصر تشعشعی را با هزینه ای کم اصلاح کند. برای مثال یک رفلکتور مسطح^۱، به شرطی که ابعادش به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌تواند گلبرگی فرعی^۲ پشت آنتن را حذف کند و یا آنتن پارابولیک می‌تواند تشعشع شده از یک فید را در یک راستا متمرکز کند. در کلی ترین حالت، یک رفلکتور را میتوان به گونه‌ای سنتز^۳ کرد که پترن بازتابی دلخواهی از یک عنصر تشعشعی ایجاد کند.

آنتن‌های رفلکتوری پارابولیک بدون شک پرکاربردترین آنتن‌های دایرکتیو هستند. دلیل این موضوع هزینه نسبتاً کم در ساخت و نگهداری، ماهیت غیر رزونانسی و پهنای باند وسیع، دایرکتیوی بسیار بالا و قابلیت تشعشع توان بالای آنها است. همچنین امپدانس ورودی آنها اندکی با امپدانس ورودی فید متفاوت است. این آنتنها حجم زیادی از تحقیقات مربوط به آنتنها را تاکنون به خود اختصاص داده اند. به عنوان نمونه، علاوه بر آنچه که میتوان در همه کتابهای کلاسیک آنتن در باب رفلکتورها یافت، کتابهای دیگری نیز منحصرأ به منظور تحلیل این آنتن‌ها تدوین شده‌اند که از بین آنها می‌توان به [۱-۴] اشاره کرد.

در این مقاله کلیات ضروری از آنتن‌های رفلکتوری پارابولیک بیان خواهد شد. این مباحث شامل هندسه این آنتن‌ها و معادلات مربوط به آن می‌شود. همچنین روش تحلیل این رفلکتورها با استفاده از تئوری نور فیزیکی بیان خواهد شد. بر اساس معادله انتگرالی تشعشع رفلکتور می‌توان پارامترهایی از آن شامل دایرکتیوی بیشینه و ضرایب کارایی را به دست آورد. در نهایت پس از تشریح الگوریتم طراحی به طراحی یک آنتن رفلکتوری در باند Q می‌پردازیم. این آنتن را یک‌بار با روش عددی توضیح داده شده، در مقاله و بار دیگر با استفاده از نرم افزار تجاری FEKO تحلیل می‌کنیم. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که طراحی و شبیه سازی عددی از سازگاری مناسبی برخوردارند.

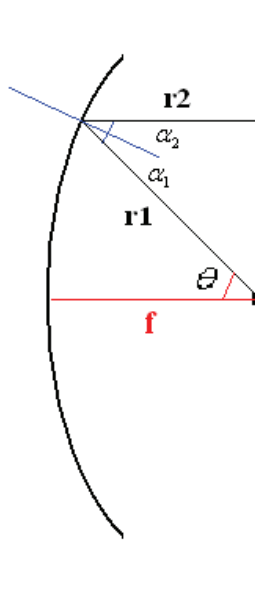
1.Flat Reflector

2. Side lobes

3.Synthesize

مروری بر هندسه رفلکتورهای پارابولیک

به رفلکتور استوانه‌ای یا سه بعدی که معادله آن یک سهمی باشد، اصطلاحاً رفلکتور پارابولیک یا سهموی گفته میشود. این رفلکتور که ایده آن از آینه‌های سهموی گرفته شده است، اگر به صورتی قرار گیرد که محور آن (خطی که راس آن را به کانونش وصل میکند) منطبق بر محور Z باشد، هر برشی از آن در صفحات $\varphi = cte$ یک سهمی است.



شکل ۱ سطح مقطع یک رفلکتور پارابولیک

فرض کنیم در شکل ۱ بخواهیم مکان هندسی نقاطی را پیدا کنیم که به ازای هر زاویه θ ، مجموع

$r_1 + r_2$ مقدار ثابتی برابر $2f$ باشد. داریم:

$$r_1 + r_2 = r_1 + r_1 \cos \theta = r_1 (1 + \cos \theta) = 2f \quad (۱)$$

بنابراین معادله رفلکتور به صورت زیر می‌شود.

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \theta} = f \sec^2 \theta / 2 \quad (۲)$$

همچنین می‌توانیم زوایای α_1 و α_2 را محاسبه کنیم. برای این کار، بردار عمود بر سطح رفلکتور را به دست می‌آوریم.

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \left(f - r \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)}{\left| \nabla \left(f - r \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \right|} = -\mathbf{a}_r \cos \frac{\theta}{2} + \mathbf{a}_\theta \sin \frac{\theta}{2} \quad (۳)$$

و سپس

$$\cos \alpha_1 = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_r = \cos \frac{\theta}{2} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{\theta}{2} \quad (۴)$$

از تساوی زاویه تابش و بازتاب در سطح رفلکتور داریم:

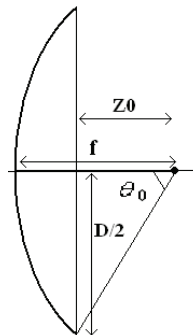
$$\alpha_1 = \alpha_2 \Rightarrow \alpha_1 + \alpha_2 = \theta \quad (۵)$$

بنابراین پرتوهای بازتاب شده از سطح رفلکتور با هم موازی‌اند و مسیرهای هم‌طولی را طی می‌کنند. لذا تمام میدان‌های هم‌فاز تشعشع شده از فید که به سطح رفلکتور می‌رسند، در صفحات موازی با دهنه رفلکتور با هم هم‌فاز هستند و در زاویه 180° درجه از محور Z قرار می‌گیرند. این تحلیل که بر مبنای نور هندسی انجام شده است، پیش‌بینی می‌کند که آنتن، دایرکتیویته زیادی داشته باشد.

در هندسه رفلکتور، دانستن روابطی که پارامترهای مختلف آن را به هم مرتبط می‌کند هم از جهت طراحی و هم از جهت تحلیل مهم‌اند. پارامترهای یک رفلکتور، قطر دهانه D، کانون f، زاویه باز شدگی θ_0 و عمق $(f - z_0)$ آن می‌باشند که همگی در شکل ۲ دیده می‌شوند.

با توجه به شکل ۲ میتوان دریافت که

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{D/2}{z_0} \right) \quad (۶)$$



شکل ۲ پارامترهای هندسی یک رفلکتور پارابولیک

همچنین از معادله رفلکتور داریم:

$$r + r \cos \theta = 2f \Rightarrow \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 2f - z \quad (۷)$$

اگر مرز رفلکتور را در معادله فوق قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$z_0 = f - \frac{D^2}{16f} \quad (۸)$$

که با جاگذاری آن در (۶) داریم:

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} \left(\frac{f}{D} \right)}{\left(\frac{f}{D} \right)^2 - \frac{1}{16}} \right) \quad (۹-ا)$$

از رابطه فوق به راحتی میتوان به نتیجه زیر رسید:

$$\frac{f}{D} = \frac{1}{4} \cot \frac{\theta_0}{2} \quad (۹-ب)$$

همچنین مکان کانون با دانستن قطر دهانه و عمق رفلکتور به دست می آید:

$$f = \frac{D^2}{16(f - z_0)} \quad (۱۰)$$

تحلیل رفلکتورهای پارابولیک

منظور از تحلیل رفلکتورها، به دست آوردن شکل پترن، دایرکتیویته، بهره یا کارایی، بهره، عرض بیم، سطح توان گلبرگ فرعی، محل آنها و امپدانس ورودی است.

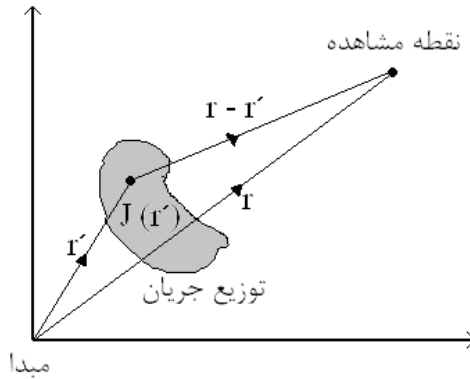
امپدانس ورودی یک آنتن رفلکتوری اندکی متفاوت با امپدانس ورودی فید است. به طور تجربی در آنتن پارابولیک هر چه عرض بیم فید بیشتر و فاصله آن با رفلکتور نسبت به طول موج بیشتر باشد، این تفاوت کمتر است. بنابراین امپدانس آنتن رفلکتوری را از مجموعه تحلیل خارج می کنیم و به سایر پارامترها می پردازیم.

برای تحلیل رفلکتورها دو روش متفاوت وجود دارد که روش اول بر مبنای نور هندسی و نظریه منابع معادل^۱ است و با نام "روش توزیع پنجره" شناخته میشود و روش دوم بر مبنای به دست آوردن توزیع

جریان الکتریکی بر سطح رفلکتور بر مبنای نور فیزیکی است و با نام "روش توزیع جریان" شناخته می شود [۴][۶]. در این بخش به ارائه نتایج روش توزیع جریان می پردازیم که روش کارآمدتری است. در این روش با فرض آنکه توزیع جریان الکتریکی (توزیع جریان واقعی) بر سطح رفلکتور مشخص

1. Equivalent sources یا Huygens theorem

باشد، میدان‌های ناشی شده از آن را به دست می‌آوریم. حال هر چه توزیع جریان بر سطح رفلکتور که ناشی از فید است با دقت بیشتری محاسبه شود، میدان بازتابی از رفلکتور دقیق‌تر برآورد خواهد شد. در اینجا اطلاعات مربوط به پلاریزاسیون دست نخورده می‌ماند. همچنین اگر جریان در لبه‌ها هم دقیق محاسبه شود، تفرق از آنها قابل محاسبه است. بی آنکه وارد جزئیات محاسبات شویم، نتیجه را به این صورت بیان می‌کنیم. که مطابق شکل ۳ اگر بر سطحی دلخواه توزیع جریان الکتریکی J را داشته باشیم که با بردار \hat{r} مشخص می‌شود پترن میدان دور در نقطه‌ای با بردار \hat{r} از رابطه زیر به دست می‌آید [۲]



شکل ۳ محاسبه میدان دور ناشی از یک توزیع جریان محدود

$$E_r = 0$$

$$E_\theta = -j \frac{\mu\omega}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_{S'} J_\theta(r') e^{jkr' \cdot \mathbf{a}_r} ds' \quad (11)$$

$$E_\phi = -j \frac{\mu\omega}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_{S'} J_\phi(r') e^{jkr' \cdot \mathbf{a}_r} ds'$$

در معادله (۱۱) J_θ و J_ϕ مولفه‌های θ و ϕ توزیع جریان در مختصات کروی هستند و \mathbf{a}_r بردار یکه در راستای مشاهده (\mathbf{r}) می‌باشد. S' سطحی است که توزیع جریان روی آن قرار دارد و dS' جزء دیفرانسیلی آن سطح می‌باشد. μ ضریب تراوایی فضای آزاد، k عدد موج و ω فرکانس زاویه ای است.

برای موضوع خاص رفلکتورهای پارابولیک باید جزء دیفرانسیلی سطح، حاصلضرب داخلی $\hat{r} \cdot \mathbf{a}_r$ و توزیع جریان سطحی بر حسب میدان الکتریکی فید محاسبه شوند. داریم [۲]:

$$ds' = r'^2 \sin \theta' \sec \frac{\theta'}{2} d\phi' d\theta' \quad (12)$$

$$\mathbf{r}' \cdot \mathbf{a}_r = r' [\sin \theta' \sin \theta \cos(\varphi - \varphi') + \cos \theta' \cos \theta] \quad (13)$$

$$\mathbf{J}_s = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i = \frac{2}{\eta} \mathbf{n} \times \mathbf{a}_r \times \mathbf{E}^i \quad (\bar{14})$$

که در آن

$$\mathbf{E}^i = \frac{E_{\theta}^i \mathbf{a}_{\theta} + E_{\varphi}^i \mathbf{a}_{\varphi}}{r'} \exp(-jkr') \quad (14\text{-ب})$$

E_{θ} و E_{φ} مولفه‌های میدان دور فید هستند که افت فضای آزاد در آنها لحاظ نشده است.^۱ با جاگذاری روابط (۱۲) تا (۱۴-ب) در (۱۱) خواهیم داشت:

$$E_{\theta}^i = \cos^m \theta' |\cos \varphi'|, \quad E_{\varphi}^i = \cos^n \theta' |\sin \varphi'| \quad (15)$$

که در آن کرانه‌های انتگرال، مرز رفلکتور را در راستاهای θ و φ نشان می‌دهند. عبارت $(\pi D/\lambda)^2$ دایرکتیویته آنتن پنجره‌ای دایروی با قطر D با توزیع یکنواخت و فاز ثابت است. بنابراین بخش باقی مانده را بازده آنتن می‌نامیم و با ϵ_{ap} نشان می‌دهیم.

برای فیدی که میدان الکتریکی آن در راستای x باشد، می‌توانیم شکل پترن‌های زیر را برای مولفه‌های میدان دور آن در زاویه رو به رو ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) فرض کنیم.^۲

$$D_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \cot^2 \theta_0 \frac{\left| \int_{\theta'=0}^{\theta_0} \int_{\varphi'=0}^{2\pi} (\mathbf{a}_{\theta} E_{\theta}^i + \mathbf{a}_{\varphi} E_{\varphi}^i) \frac{\sin \theta'}{1 + \cos \theta'} d\varphi' d\theta' \right|^2}{\int_{\theta'=0}^{\pi} \int_{\varphi'=0}^{2\pi} |\mathbf{a}_{\theta} E_{\theta}^i + \mathbf{a}_{\varphi} E_{\varphi}^i|^2 \sin \theta' d\varphi' d\theta'} \quad (\bar{17})$$

و اگر میدان الکتریکی فید در راستای y باشد، خواهیم داشت:

$$E_{\theta}^i = \cos^m \theta' |\sin \varphi'|, \quad E_{\varphi}^i = \cos^n \theta' |\cos \varphi'| \quad (17\text{-ب})$$

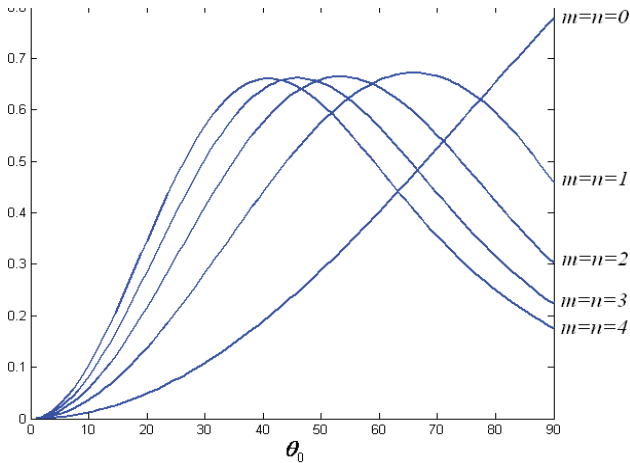
که m و n اعداد صحیح نامنفی هستند.

اگر ϵ_{ap} را به ازای پترن داده شده در (۱۷-ب) برای $m=n$ رسم کنیم، نمودارهای شکل ۴ به دست می‌آیند که نمودارهای بسیار مهمی هستند و نشان می‌دهند که زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور در برابر فیدهای مختلف با پترن‌های مختلف باید چه مقدار باشد. به عنوان مثال پترن یک هورن به عنوان

۱ - باید دقت کرد که قرار گرفتن رفلکتور در میدان نزدیک فید، اعتبار نتایج حاصل از این روش تحلیل را مخدوش می‌نماید. به عبارت دیگر حضور رفلکتور در میدان نزدیک توزیع جریان فید را تغییر داده و اجازه تحلیل مجزای این دو را نمی‌دهد. میدان دور یک آنتن از فاصله $2L/\lambda$ آن شروع می‌شود که L در آن بزرگترین بعد آنتن و λ طول موج است.

۲ - در سایر زاویه‌ها صفر فرض میشود.

فید اگر با $m=n=1$ در (۱۷-ب) تقریب زده شود، از نمودار شکل ۴ می‌بینیم که باید زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور حدود ۶۵ درجه باشد.



شکل ۴ بهره پنجره یک رفلکتور به ازای فیدهایی با عرض بیمهای متفاوت برحسب زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور

در عمل علاوه بر بهره پنجره مسائل دیگری نیز مانند:

- انحراف سطح رفلکتور از معادله پارابولیک (\mathcal{E}_d) ،
- وجود ناهمواری تصادفی در سطح رفلکتور (\mathcal{E}_r) ،
- عدم تقارن دامنه‌ی میدان فید (\mathcal{E}_a) ،
- یکنواخت نبودن توزیع فاز فید بر سطح رفلکتور (\mathcal{E}_p) ،
- مولفه‌های با پلاریزاسیون متقاطع در میدان بازتابی (\mathcal{E}_x) ،
- محدود بودن سطح رفلکتور (که باعث هدر رفتن بخشی از توان فید که در زاویه‌های بزرگتر از θ_0 تشعشع می‌شود، می‌گردد.) (\mathcal{E}_s) ،
- ممانعت فید از تشعشع رفلکتور در زوایه‌ای که فید راه امواج را مسدود کرده است (\mathcal{E}_b) ،
کارایی رفلکتور را کاهش میدهند و داریم:

$$\mathcal{E}_{total} = \mathcal{E}_{ap} \mathcal{E}_d \mathcal{E}_r \mathcal{E}_a \mathcal{E}_p \mathcal{E}_x \mathcal{E}_s \mathcal{E}_b \quad (18)$$

انحراف سطح رفلکتور باعث میشود که توزیع دامنه و فاز در صفحه دهانه رفلکتور به ترتیب نامتقارن و غیر یکنواخت شود. لذا پیش بینی می شود دایرکتیویته رفلکتور کاهش پیدا کند. ناموازی شدن امواج بازتابی از سطح رفلکتور نتیجه مستقیم این انحراف است. گاهی مکان فید را به عمد به میزان کمی تغییر می دهند تا انحراف سطح رفلکتور جبران شود. زیرا به طور عمومی می توان گفت که انحراف فید در راستای محور رفلکتور باعث غیر یکنواخت شدن توزیع فاز و در راستای عمود بر محور رفلکتور باعث عدم تقارن دامنه می شود. لذا اگر محدوده این انحرافات در بازه بسیار کمی باشد، می توان آن را با تغییر کوچکی در معادله رفلکتور جبران کرد و برعکس. آنچه مسلم است عدم تقارن دامنه میدان فید بر سطح رفلکتور و یا توزیع غیر یکنواخت فاز بر سطح آن باعث چرخش بیم اصلی می شود. در رفلکتورهای بزرگ، وزن، نیروی باد، تغییرات دمایی، شتاب زاویه ای اگر رفلکتور چرخنده باشد و... می توانند عامل این تغییر شکل باشند.

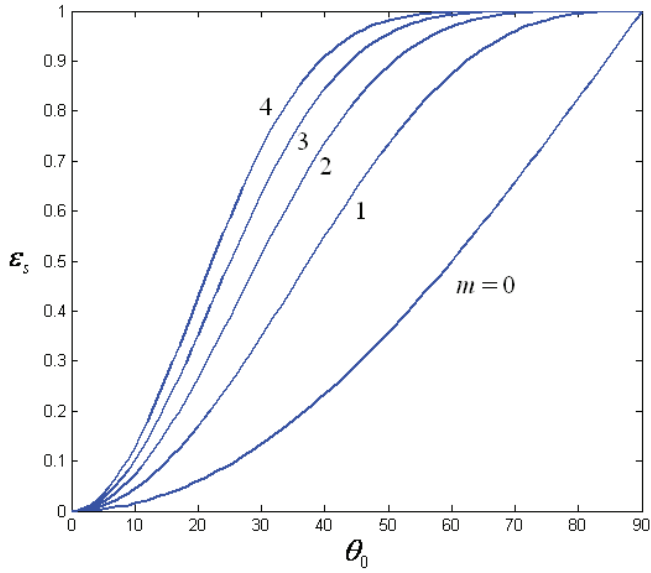
در مورد پلاریزاسیون متقاطع^۱ نیز باید به این نکته توجه کرد که عدم تناسب پلاریزاسیون آنتن های فرستنده و گیرنده، موجب اتلاف بخشی از انرژی می گردد. عموماً از هورن ها به عنوان فید رفلکتور استفاده می شود. اگر میدان الکتریکی در دهانه هورن در راستای y باشد، رفلکتور میتواند پلاریزاسیون های دیگر را نیز ایجاد کند. هرچه انحنای رفلکتور بیشتر باشد، دامنه مولفه های با پلاریزاسیون متقاطع، بیشتر می شود.

محدود بودن رفلکتور که به زاویه دهانه کمتر از 90° درجه می انجامد نیز میتواند یک عامل در هدر رفتن انرژی باشد. به این معنی که بخشی از توان فید که به خارج سطح رفلکتور می تابد سهمی در پترن آن ندارد و اصطلاحاً از آن سرریز می شود. داریم:

$$\epsilon_s = \frac{\int_{\theta=0}^{\theta_0} \int_{\phi=0}^{2\pi} \left\{ |E_\theta^i|^2 + |E_\phi^i|^2 \right\} \sin \theta' d\phi' d\theta'}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \left\{ |E_\theta^i|^2 + |E_\phi^i|^2 \right\} \sin \theta' d\phi' d\theta'} \quad (19)$$

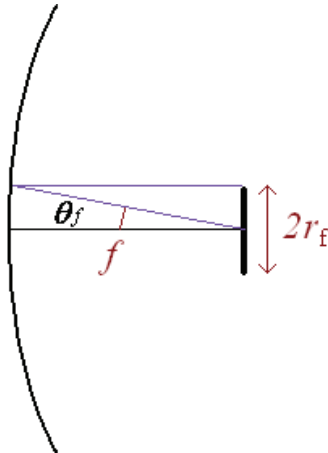
برای پترن (۱۷-ب) به ازای $m = n$ بهره سرریز رفلکتور در شکل ۵ رسم شده است.

1. Cross-polarization



شکل ۵ بهره سرریز یک رفلکتور به ازای فیدهایی با عرض بیم‌های متفاوت برحسب زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور

آخرین مقوله ای را که در این بخش مورد بررسی قرار می‌دهیم، اثر فید در سد کردن راه امواج بازتابی از سطح رفلکتور است. شکل ۶ رفلکتوری را نشان می‌دهد که قطر دهانه فید آن $2r_f$ است. زاویه انسداد فید، θ_f ، از رابطه (۲۰) به دست می‌آید.



شکل ۶ زاویه انسداد فید

$$\theta_f = \tan^{-1}(r_f / f)$$

(۲۰)

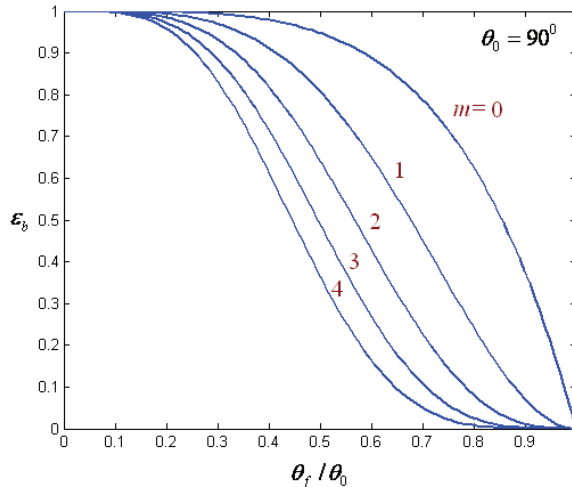
در ناحیه بین رفلکتور و فید، امواج ایستا شکل میگیرند که هرچه توان ذخیره شده در آن بیشتر باشد (که معادل بیشتر بودن دایرکتیویتی فید است)، VSWR آنتن افزایش مییابد. برای ارائه یک الگوی تقریبی از اثر حضور فید، میتوانیم فرض کنیم که توزیع جریان در ناحیه‌ای به شعاع r_f (یا زاویه باز شدگی θ_f) صفر است. این تقریب در جایی که قطر رفلکتور بزرگ باشد به خوبی قابل اعمال است^۱. با این فرض بهره مربوط به انسداد فید از رابطه زیر به دست می آید:

$$\epsilon_b = 1 - \frac{\left| \int_{\theta'=0}^{\theta_f} \int_{\phi'=0}^{2\pi} (\mathbf{a}_\theta E_\theta^i + \mathbf{a}_\phi E_\phi^i) \frac{\sin \theta'}{1 + \cos \theta'} d\phi' d\theta' \right|^2}{\left| \int_{\theta'=0}^{\theta_0} \int_{\phi'=0}^{2\pi} (\mathbf{a}_\theta E_\theta^i + \mathbf{a}_\phi E_\phi^i) \frac{\sin \theta'}{1 + \cos \theta'} d\phi' d\theta' \right|^2} \quad (21)$$

که برای توزیع کسینوسی در (۱۷-ب) به ازای $m=n$ به صورت

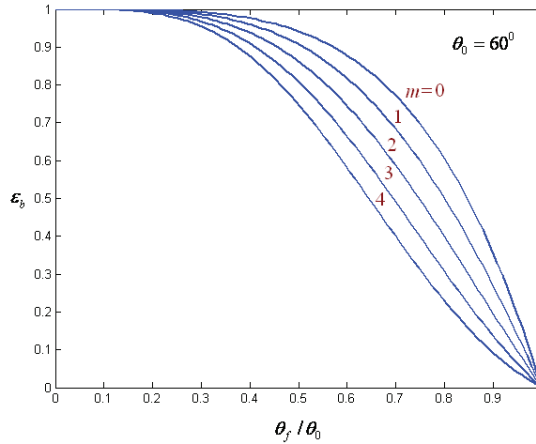
$$\epsilon_b = 1 - \frac{\left| \int_{\theta'=0}^{\theta_f} \cos^m \theta' \frac{\sin \theta'}{1 + \cos \theta'} d\theta' \right|^2}{\left| \int_{\theta'=0}^{\theta_0} \cos^m \theta' \frac{\sin \theta'}{1 + \cos \theta'} d\theta' \right|^2} \quad (22)$$

در می آید. شکل ۷، ϵ_b را به ازای $m = 1, 2, 3, 4$ و نسبت θ_f/θ_0 نشان میدهد.



(۱)

۱- این نتایج برای بیم اصلی کاملاً صادق است. اما برای گلبرگ فرعی به خصوص آنهایی که دورترند درست نخواهد بود.



(ب)

شکل ۷ بهره انسداد فید آ) به ازای $\theta_0=900$ و ب) به ازای $\theta_0=600$

روش عددی در محاسبه انتگرال تشعشی

با افزایش کارایی رایانه‌های جدید هم از بُعد سرعت و هم از بُعد حافظه، روش‌های تحلیلی مانند روش راش^۱، روش ژاکوبی-بسل^۲، روش فوریه-بسل^۳، روش نمونه برداری^۴ و روش فاز مربعی^۵ و ... [۲] کم کم جای خود را به روش‌های عددی می‌دهند. اغلب، روش‌های عددی بسیار ساده هستند و حجم عمده کار بر عهده رایانه قرار می‌گیرد.

در روش عددی نیازی به کامل فرض کردن رفلکتور نداریم. به عبارتی مساحت آن ممکن است در بازه‌ای که آن را با کرانه‌های انتگرال نشان می‌دهیم، محصور شده باشد. با استفاده از معادله (۱۵) و فرض اینکه تنها مولفه‌های (θ, φ) در میدان‌های الکتریکی مد نظر باشند و همچنین وابستگی به متغیر r هم در میدان دور فید و هم در میدان دور رفلکتور حذف شده باشد، این معادله را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\mathbf{E}^r = -j \frac{f \mu \omega}{\eta \pi} \int_{\bar{\theta}_1}^{\bar{\theta}_2} \int_{\bar{\varphi}_1}^{\bar{\varphi}_2} \mathbf{E}^i e^{jk \frac{2f}{1+\cos\theta'} [-1 + \sin\theta' \sin\theta \cos(\varphi-\varphi') + \cos\theta' \cos\theta]} \frac{\sin\theta'}{1+\cos\theta'} d\varphi' d\theta' \quad (۲۳)$$

1. Rusch's method
2. Jacobi-Bessel method
3. Fourier-Bessel method
4. Sampling method
5. Quadratic Phase method

حال کافی است بازه‌های مذکور را به M و N قسمت تقسیم کنیم. این تقسیم بندی را به صورت یکنواخت و به شکل زیر انجام می‌دهیم:

$$\begin{aligned}\theta'_m &= \bar{\theta}_1 + (m-1)\Delta\theta' ; m=1 \rightarrow M+1 \\ \Delta\theta' &= \frac{\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1}{M} \\ \varphi'_n &= \bar{\varphi}_1 + (n-1)\Delta\varphi' ; n=1 \rightarrow N+1 \\ \Delta\varphi' &= \frac{\bar{\varphi}_2 - \bar{\varphi}_1}{N}\end{aligned}\quad (24)$$

بنابراین رابطه انتگرالی با سری دوگانه زیر تقریب زده می‌شود:

$$\mathbf{E}^r \approx -j \frac{f\mu\omega}{\eta\pi} \Delta\theta\Delta\varphi' \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{n=1}^{N+1} \mathbf{E}^i(\theta'_m, \varphi'_n) \exp\left(jk \frac{2f}{1+\cos\theta'_m} [-1 + \sin\theta'_m \sin\theta \cos(\varphi - \varphi'_n) + \cos\theta'_m \cos\theta]\right) \frac{\sin\theta'_m}{1+\cos\theta'_m} \quad (25)$$

میدان الکتریکی فید به راحتی میتواند از نرم افزارهای شبیه ساز مانند HFSS یا CST فراخوانی شود و یا حتی از داده های مربوط به اندازه گیری حاصل شود.

مبانی طراحی رفلکتور و فید

در این بخش نکاتی را در مورد طراحی فید رفلکتور بیان میکنیم. بعد از توانایی لازم در تحلیل یک رفلکتور باید طراحی خود را انجام و سپس با روش عددی ای که در بخش قبل دیدیم، آن را مورد تایید قرار دهیم.

بنابر هدف مشخصی آنتن فید باید انتخاب شود که شامل توان قابل ارسال، پهنای باند، شکل پترن مطلوب و ... میشود. به عنوان یک اصل مهندسی، طراح خوب کسی است که تحلیل گر توانمندی باشد. در مورد رفلکتورها این اصل شاید با شدت بیشتری برقرار باشد. زیرا اولاً درجه آزادی طراحی کم است و در عین حال تعداد پارامترهایی که کیفیت کارکرد آن را برآورد می کنند، مانند ضرایب کارایی که در فصل قبل بررسی شد، زیاد است. بنابراین برآورده کردن همگی بسیار دشوار به نظر می‌رسد. معمولاً یک طراحی موفق با توجه به نکات زیر پیگیری می‌شود:

۱- طراح با تعیین قطر دهانه رفلکتور برای دایرکتیویته مشخص در فرکانس مرکزی، کار خود را شروع می‌کند. دیدیم که ماکزیمم دایرکتیویته ممکن برابر است با:

$$D_{0\max} = \varepsilon_{ap} \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 = \varepsilon_{ap} \left(\frac{\pi D f_c}{c}\right)^2 = \varepsilon_{ap} \left(\frac{D \omega_c}{2c}\right)^2 \quad (26)$$

که در آن f_c فرکانس و c سرعت نور است. با توجه به شکل پترن فید و تقریب آن با یکی از نمودارهای

شکل ۴، مقدار ϵ_{ap} را مشخص و سپس با توجه به ماکزیمم دایرکتیویته خواسته شده قطر رفلکتور را تعیین می‌کنیم. اگر سایر ضرایب کارایی نیز دخیل هستند، باید همگی مد نظر قرار گیرند.

۲- برای رفلکتورهای پارابولیک متقارن (که عرض بیم 3dB آن در دو صفحه E و H تقریباً با هم برابر است) مقدار عددی دایرکتیویته و عرض بیم برحسب درجه با رابطه زیر به هم مرتبط می‌شوند.

$$D_{\max} = \frac{32,400}{(\Delta\theta)^2} \quad (27)$$

۳- رفلکتور یک آنتن غیر رزونانسی است و محل کانون آن مستقل از فرکانس میباشد. برای به دست آوردن پهنای باند نصف توان آن می‌توانیم به شکل زیر عمل کنیم:

$$E(\theta', \varphi', r') = f_2^i(\varphi') \sec^2 \frac{\theta'}{2} \frac{e^{-jkr'}}{r'} = f_2^i(\varphi') \sec^2 \frac{\theta'}{2} \frac{e^{-jkr'}}{f \sec^2 \frac{\theta'}{2}} = f_2^i(\varphi') \frac{e^{-jkr'}}{f} \quad (28)$$

که نشان دهنده پهنای باند نسبی $\sqrt{2} \times 100\%$ است. این پهنای باند بسیار زیاد است و در عمل آنچه پهنای باند آنتن را مشخص می‌کند، پهنای باند فید است.

۴- طراح برای جلوگیری از ایجاد مولفه‌های متقاطع باید از انحنای زیاد رفلکتور جلوگیری کند. آنچه توصیه می‌شود انتخاب است.

$$\left(\frac{\pi D f_c}{c}\right)^2 = 2 \left(\frac{\pi D f_1}{c}\right)^2 \Rightarrow \text{Band width} = 2f_1 = \sqrt{2} f_c \quad (29)$$

۵- فید تفکیک پذیری که شکل پترن آن

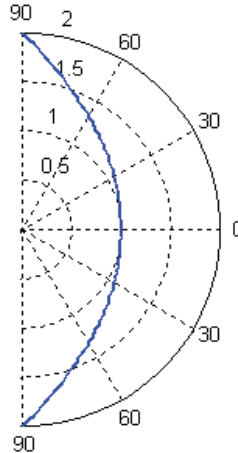
$$0.2 < f / D < 0.5 \quad (30)$$

است، توزیع دامنه مستقل از θ بر سطح رفلکتور ایجاد می‌کند. این موضوع از آنجا نشأت می‌گیرد که میدان الکتریکی این فید در سطح رفلکتور برابر (۳۱) می‌شود. اگر پترن مستقل از φ نیز باشد، توزیع یکنواخت بر سطح رفلکتور حاصل می‌شود.

$$f(\theta', \varphi') = f_1^i(\theta') f_2^i(\varphi') = \sec^2 \frac{\theta'}{2} f_2^i(\varphi') \quad (31)$$

بنابراین از دید تئوری این فید یک فید آرمانی برای رفلکتور است. پترن این فید در شکل ۸ کشیده شده است. در عمل ساخت فیدی با این مشخصه دشوار است و معمولاً برای رفلکتورهای بزرگ توسط

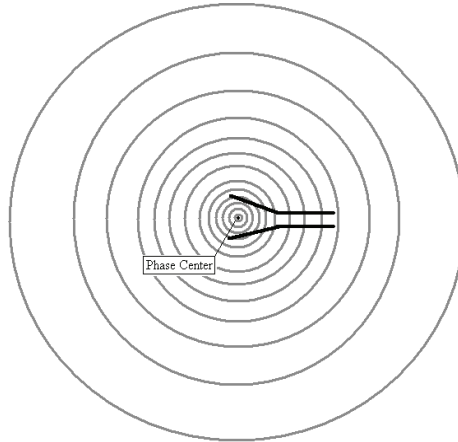
آرایه‌های صفحه‌ای سنتز میشوند. از طرف دیگر دامنه میدان در لبه رفلکتور بالا است که منجر به افزایش مولفه‌های متقاطع می‌شود و چون نمی‌تواند به صورت ناگهانی کاهش پیدا کند، سرریز از رفلکتور افزایش می‌یابد.



شکل ۸ پترن دیده می‌شود که این شکل پترن مشابه شکل رفلکتور پارابولیک است.

برای آن که سرریز نداشته باشیم و دامنه میدان در لبه‌ها کم باشد، توصیه میشود که از فیدی استفاده گردد که دامنه آن با افزایش زاویه کاهش پیدا می‌کند. این کاهش را معمولاً حدود 10dB لحاظ می‌کنند. برای جلوگیری از تفرق در لبه‌های رفلکتور، این لبه‌ها را به سمت پشت رفلکتور می‌چرخانند.

۶- مرکز یا مراکز فاز یک آنتن، نقطه یا نقاطی واقعی یا فرضی هستند که در مرکز کره‌های هم فاز جبهه ی امواج کروی قرار می‌گیرند. این نقاط به مثابه منابع نقطه‌ای (احتمالاً عرضی) هستند که وقتی بر میدان دور تمرکز می‌کنیم، گویی از آن نشأت می‌گیرند. این موضوع را می‌توانیم در شکل ۹ برای یک هورن ببینیم.



شکل ۹ مرکز فاز یک آنتن

آنچه مسلم است باید مرکز فاز فید در کانون رفلکتور قرار گیرد تا امواج بازگشتی در صفحه دهانه رفلکتور هم فاز باشند. اما در عمل، بعضی از آنتن‌ها فاقد مرکز فاز دارای چندین مرکز فاز هستند. مثلاً مرکز فاز هورن‌های استاندارد در صفحات مختلف بر هم منطبق نیستند [۷]. این امر باعث می‌شود که توزیع فاز یکنواخت نباشد و افت دایرکتیویته داشته باشیم. معمولاً اگر شکل پترن مستقل از φ باشد، مرکز فاز نیز ثابت خواهد بود. جابجا شدن مرکز فاز فید از کانون می‌تواند اثرات بسیار سوئی بر کارکرد رفلکتور داشته باشد که شامل کاهش دایرکتیویته و افزایش سطح گلبرگ فرعی می‌شود. هورن‌ها قابلیت تشعشع توان بالا با افت بازگشتی کم را دارند و این تشعشع با تقریب بسیار خوبی فقط در جهت رو به رو است. پترن هورن‌ها (به خصوص آنهایی که به صورت چند مودی^۱ طراحی می‌شوند) قابلیت شکل دهی دارند. ایجاد پلاریزاسیون دایروی با هورن با دشواری و آن هم در پهنای باند کم مقدور است. حذف مولفه‌های متقاطع با هورن‌ها ناشدنی است.

اگر یک آنتن پنجره‌ای در مد TE^{10} تحریک شده باشد، پترن نرمالیزه در صفحه E به صورت رابطه

$$F_E(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{W}{2} \sin \theta\right)}{\frac{W}{2} \sin \theta} \quad (32)$$

خواهد بود زیرا توزیع میدان در دهانه هورن در این مد و در این صفحه یکنواخت است. اما در صفحه H به صورت

$$F_H(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{L}{2} \sin \theta\right)}{(L/2)^2 \sin^2 \theta - (\pi/2)^2}$$

خواهد بود، زیرا توزیع میدان در دهانه هورن در این صفحه به صورت کسینوسی است [۶]. L و W ابعاد دهانه هورن به ترتیب در صفحات H و E میباشند. کاری که می توان کرد این است که W را بزرگتر کنیم تا پترن آن جمع تر شود. در این صورت این دو پترن در زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور با دقت خوبی بر هم منطبق میشوند. انطباق پترن های دو صفحه معمولاً به معنای به هم نزدیک شدن مراکز فاز در این دو صفحه نیز است. اگر آنتن پنجره های در مدهای دیگری تحریک شده باشد. نیز روش کار مشابه است. در مورد هورن ها، البته به دلیل توزیع فاز مربعی [۶] در دهانه، شرایط کمی دشوارتر است. با وجود این با همین روش نقطه ابتدایی طراحی را تعیین و سپس با روشهای عددی و یا نرم افزارهای تجاری آن را بهبود می بخشیم.

از آنتن های سیمی هم به عنوان فید استفاده می شود. با ترکیب آنتن سیمی طولی و حلقوی می توان مولفه های با پلاریزاسیون متقاطع را حذف کرد [۴]. همچنین پلاریزاسیون دایره ای نیز با آنتن مارپیچی به راحتی ایجاد میشود. هرچند کنترل شکل پترن دشوار است و تشعشع در هر دو سو خواهد بود. ارسال توان بالا با فید سیمی ناممکن است.

طراحی آنتن رفلکتوری در باند Q

در این بخش به طراحی یک آنتن رفلکتوری به همراه یک فید در باند ۴۰/۵ تا ۴۳/۵ گیگاهرتز می پردازیم. این آنتن برای ارتباط رادیویی راه دور و ارسال توان بالا طراحی شده است. ابتدا مشخصات فید را که هورن انتخاب شده، بیان می کنیم و سپس قطر و فاصله کانونی را به دست می آوریم. نتایج شبیه سازی فید در HFSS به ما کمک می کند تا پترن رفلکتور را با روشی که در بخش ۳ توضیح داده شد به دست آوریم. این نتایج را با نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار FEKO مقایسه می کنیم تا از صحت طراحی مطمئن شویم.

طراحی فید

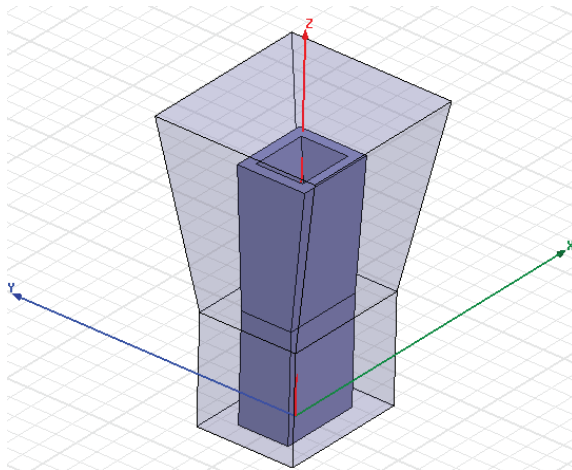
برای طراحی فید طبق آنچه که در بخش قبل گفتیم، نهایت سعی ما باید معطوف به داشتن عرض بیم های برابر در دو صفحه E و H شود. از طرفی برای آنکه مرکز فاز فید در دو صفحه بر هم منطبق شوند، باید پترن فید در این دو صفحه - حداقل در زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور - مشابه هم باشند. در نهایت، کوشش ما باید بر آن باشد که افت بازگشتی زیر 20 dB داشته باشیم. بهترین انتخاب آنتن

۱. این دو رابطه با توجه به تبدیل فوریه توزیع میدان دهانه هورن به راحتی به دست می آید.

هورن است.

هورن انتخاب شده توسط موج بر WR-22 تغذیه می‌شود که متناسب با باند کاری (30-50.5GHz) Q است. هورن‌هایی که با این کاربرد طراحی می‌شوند، مشابه هورن‌های استاندارد نیستند. به این معنا که ابعاد دهانه آنها ممکن است حتی از ابعاد سطح مقطع موج‌بر کوچکتر باشد.

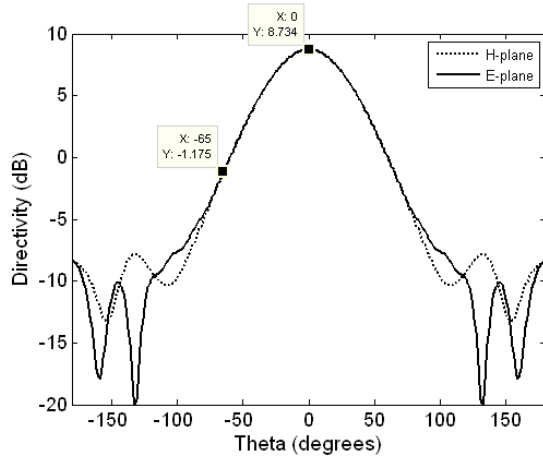
فید طراحی شده در شکل ۱۰ دیده می‌شود. این شکل که در نرم افزار HFSS کشیده شده است، هورنی را نشان می‌دهد که درون مرز تشعشعی^۱ قرار دارد. مشخصات این فید در جدول ۱ آورده شده است.



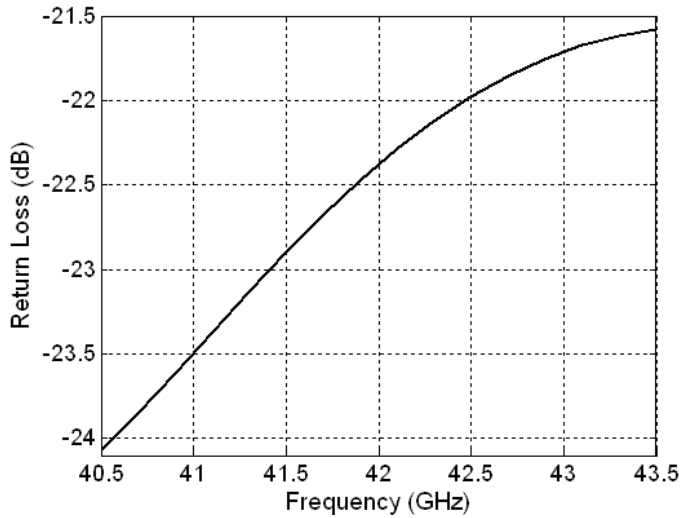
شکل ۱۰ نمای سه بعدی هورنی که فید اولین آنتن رفلکتوری است

در شکل ۱۱ پترن آنتن در نرم افزار HFSS در فرکانس مرکزی 42 GHz رسم شده است. به طوریکه دیده می‌شود پترن‌ها در دو صفحه تا حدود ۹۰ درجه دقیقاً روی هم هستند. این فید دارای پترنی است که میتوان آن را با نمودار $m=n=1$ در شکل ۴ تقریب زد. در این صورت زاویه بازشدگی دهانه رفلکتور باید حدود ۶۵ درجه باشد. به خوبی دیده می‌شود که تا زاویه ۶۵ درجه افت dB در هر دو صفحه داریم. پترن در فرکانس‌های دیگر باند نیز با دقت خوبی به همین صورت است. افت بازگشتی آنتن نیز بر حسب فرکانس در شکل ۱۲ دیده می‌شود. افت بازگشتی در سرتاسر باند زیر ۲۰ dB است که مقدار قابل قبولی است و بعد از ناحیه رزونانس قرار دارد که باعث میشود رنج تغییرات آن شدید نباشد. طبق این مشاهدات، این هورن یک فید ایده آل است.

1. Radiation Boundary



شکل ۱۱ پترن فید در صفحه H و در صفحه E در فرکانس مرکزی ۴۲GHz

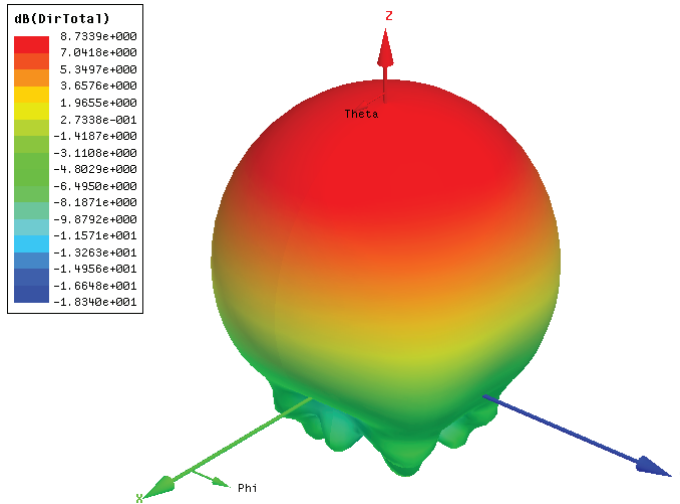


شکل ۱۲ افت بازگشتی فید

به عنوان یک نتیجه مهم، از آنجا که پهنای باند آنتن‌های رفلکتوری، از دید مشخصات پترن، از فید

به مراتب بیشتر است و حضور آن تاثیری در افت بازگشتی فید ندارد، کل طراحی رفلکتور صرفاً در فرکانس مرکزی ادامه پیدا میکند. کلیه نتایج بدون شک برای کل باند فرکانسی معتبر می‌باشد.

پترن دایرکتیویته کل به شکل سه بعدی در شکل ۱۳ دیده میشود. اهمیت پترن سه بعدی در آن است که احتمال وجود صفرهای ناخواسته یا گلبرگی ناخواسته را مرتفع می‌کند.



شکل ۱۳ پترن سه بعدی فید

جدول ۱ مشخصات فید

موجبر WR-22	نوع تحریک
40.5-43.5GHz	فرکانس کاری
5.45mm	طول پنجره هورن
4.52mm	عرض پنجره هورن
12.44mm	ارتفاع هورن
1.01mm	ضخامت بدنه
آلومینیوم	جنس
0.343mm خارج دهانه	مرکز فاز تقریبی
0.05mm	دقت ساخت

نکته دیگر، بررسی پلاریزاسیون متقاطع در پترن فید است. بررسی دامنه‌های مولفه‌های θ و ϕ میدان الکتریکی را در دو صفحه H و E طبق نتایجی که از شبیه سازی به دست می‌آید، حاکیست که آنتن فید از لحاظ پلاریزاسیون متقاطع یک آنتن ایده آل است که البته انتظار بجایی از یک هورن (که میدان‌های دهانه آن قابل جداسازی در دو راستا هستند) می‌باشد.

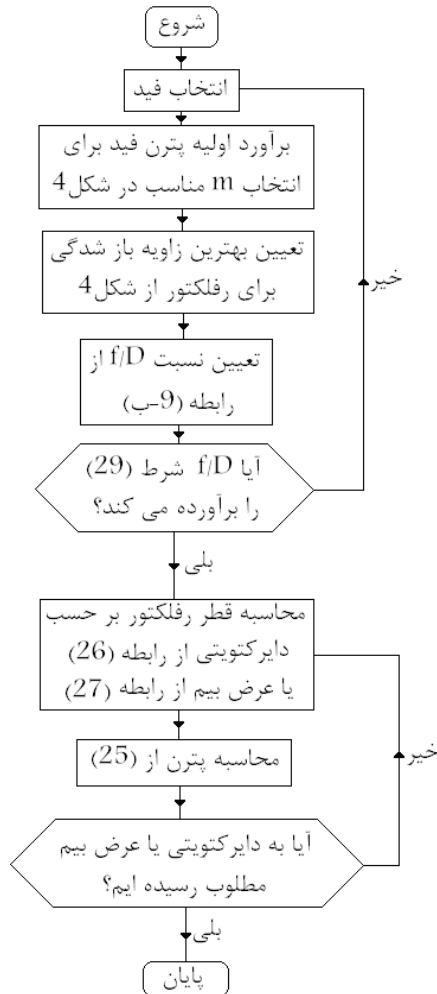
در بین نرم افزارهای تجاری موجود، تنها CST مرکز فاز پترن آنتن را در زوایای مشخص مستقیماً تعیین می‌کند. از این رو آنتن فید را بار دیگر با نرم افزار CST تحلیل می‌کنیم و میانبهره مراکز فاز در دو صفحه را که در جدول ۱ ارائه شده است، به دست می‌آوریم.

طراحی رفلکتور

طبق رابطه (۹-ب) نسبت f/D را برابر 0.39 به ازای زاویه بازشدگی ۶۵ درجه به دست می‌آوریم که در شرط (۲۹) می‌گنجد.

در رفلکتور عرض بیم خواسته شده برابر $1/6$ درجه است. از رابطه (۲۷) دایرکتیویته بیشینه و از رابطه (۲۶) قطر رفلکتور را به دست می‌آوریم. سپس با داشتن پترن فید و رابطه (۲۵) پترن رفلکتور را محاسبه می‌کنیم. اگر عرض بیم مطلوب به دست آمده باشد، طراحی تمام است. در غیر این صورت

قطر رفلکتور را بنا بر نتیجه به دست آمده تغییر می‌دهیم و عملیات را تکرار می‌کنیم. قطر رفلکتور برابر ۳۰ سانتیمتر و فاصله کانونی آن $11/7$ سانتیمتر به دست می‌آیند. این الگوریتم در فلوچارت شکل ۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۴ فلوجارت طراحی آنتنهای رفلکتوری

مشخصات رفلکتور در جدول ۲ و پترن آن در دو صفحه E و H به همراه مولفه‌های با پلاریزاسیون متقاطع در قسمت (ت) شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.

بررسی حساسیت ساخت در رفلکتورها

در مورد رفلکتورها سه گونه خطا ممکن است رخ دهد که عبارتند از:

۱. عدم دقت در معادله رفلکتور که پارابولیک نباشد. این خطا برای رفلکتورهای یک تکه (با

ابعاد کم) قابل تحمل نیست و به هیچ عنوان نباید رخ دهد.

۲. ناصافی سطح که با جذر مجموع مربعات ناصافی‌های موضعی اندازه گیری می‌شود.

۳. خطای انحراف مرکز فاز فید از کانون رفلکتور.

در اینجا به دو مورد آخر می‌پردازیم. مورد دوم را می‌توان با آبکاری سطح تا حدودی جبران کرد تا خلل و فرج سطح گرفته شود. با استفاده از نرم افزار PCAAD به صورت تحلیلی می‌توانیم نمودار شکل ۱۶ را برای رفلکتور به دست آوریم که تغییرات دایرکتیویته را به ازای جذر مجموع مربعات خطای سطح نشان می‌دهد^۱.

30cm	قطر
11.7cm	کانون
1.1cm	شعاع انسداد ^۱
40.63dB	دایرکتیویته
1.6deg	عرض بیم
-29dB	SLL
0.01cm	دقت ساخت (ماکزیمم RMS خطای سطح)

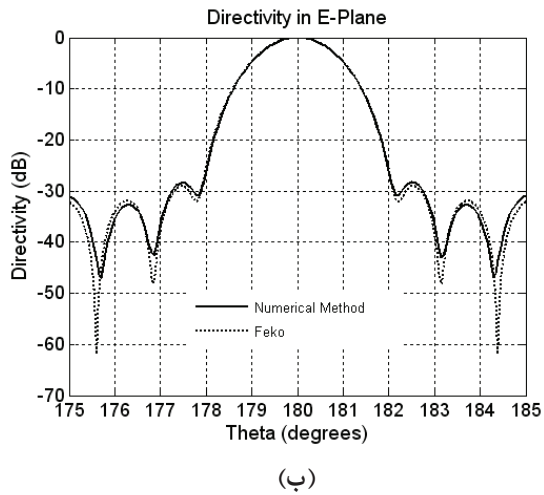
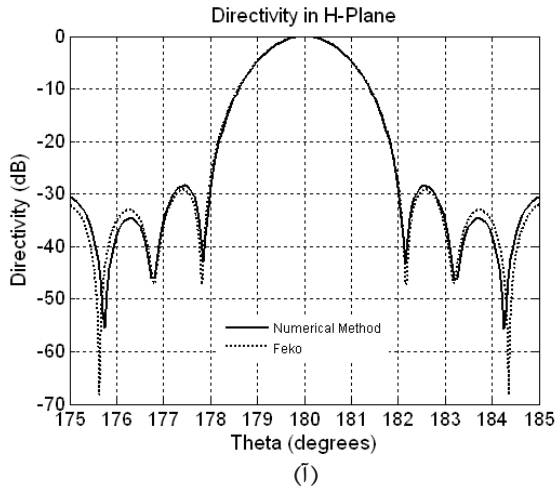
جدول ۲ مشخصات رفلکتور

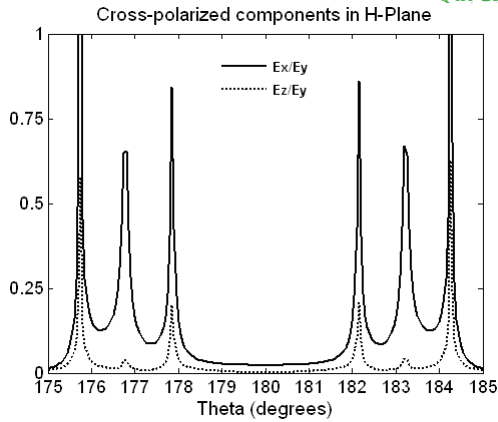
این نمودار به خوبی نشان می‌دهد که ماکزیمم جذر مجموع مربعات (RMS) خطاهای سطحی باید زیر ۰/۰۱ سانتیمتر باشد.

برای مورد سوم میتوان به مرجع [۸] مراجعه کرد. به طور کلی تاثیر جابجایی فید بر روی محور رفلکتور در راستای دور شدن یا نزدیک شدن از آن باعث کاهش دایرکتیویته و افزایش سطح لوبه‌های فرعی می‌شود. به عنوان مثال دور شدن مرکز فاز فید از کانون روی محور رفلکتور تنها به اندازه نیم طول موج میتواند دایرکتیویته را 2 dB الی 3 dB کاهش و سطح اولین لوب فرعی را تا 9 dB بالاتر ببرد [۸]. جابه جایی فید در صفحه کانونی نیز هم باعث کاهش دایرکتیویته و هم از دست رفتن

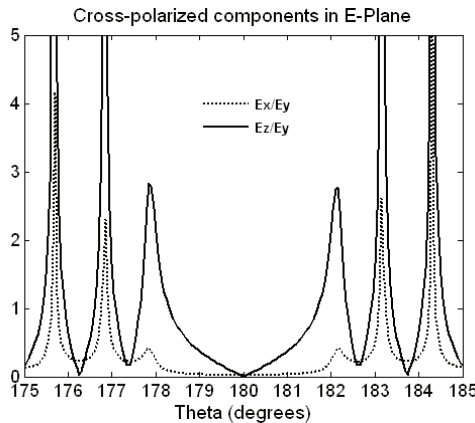
۱ - تفاوت دایرکتیویته ماکزیمم با آنچه در بخش‌های قبل دیدیم، به دلیل تحلیلی و غیر دقیق بودن نتایج این نرم افزار است. اما در هر صورت این نمودار دید خوب و مناسبی نسبت به میزان تغییرات دایرکتیویته به ازای مجموع مربعات خطای سطح می‌دهد.

تقارن پترن می‌شود زیرا باعث می‌شود توزیع دامنه و فاز میدان بر سطح رفلکتور متقارن نباشد.





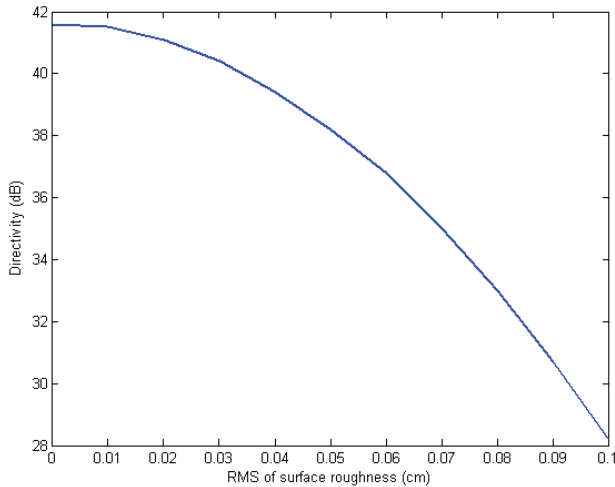
(پ)



(ت)

شکل ۱۵ (آ) پترن رفلکتور در صفحه H (ب) پترن رفلکتور در صفحه E (پ) دامنه مولفه های با پلاریزاسیون متقاطع در صفحه H (ت) دامنه مولفه های با پلاریزاسیون متقاطع در صفحه E.

قابل ذکر است که میدان الکتریکی در دهانه هورن در راستای Y هستند. بنابراین مولفه هایی از میدان بازتابی رفلکتور که در راستای X یا Z هستند، مولفه های با پلاریزاسیون متقاطع به حساب می آیند. نمودارهای (آ) و (ب) هم توسط روش عددی توضیح داده شده در مقاله محاسبه شده اند و هم توسط نرم افزار FEKO. اما دو نمودار (پ) و (ت) تنها توسط روش عددی مشروح حاصل شده اند.



شکل ۱۶ افت دایرکتیوی به ازای افزایش خطای سطح

نتیجه گیری

در این مقاله ویژگی‌ها و روش تحلیل رفلکتورهای پارابولیک مورد مروری کلی قرار گرفته است. اصول کلی جمع بندی شده و به روشی گویا جهت طراحی ساده این نوع آنتن‌ها در قالب یک الگوریتم طراحی ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا هندسه رفلکتورها بیان شد و سپس روش تحلیل توزیع جریان و نحوه استخراج انتگرال تشعشعی رفلکتور بر اساس آن مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این انتگرال، دایرکتیوی بیشینه و ضرایب کارایی رفلکتور برای فیدهای خاص محاسبه گردید. در ادامه، نحوه حل عددی انتگرال به منظور استخراج پترن رفلکتور در صفحات دلخواه ارائه شد. با استفاده از الگوریتم طراحی ارائه شده، یک رفلکتور به همراه فید آن در باند Q طراحی و شبیه سازی گردید و آنالیز حساسیت آن انجام شد. اصولاً دو موضوع در این مقاله در مورد رفلکتورها مورد بحث قرار نگرفت. اولین آنها استفاده از رفلکتورهای چندگانه می‌باشد که در واقع یک فید به همراه یک یا چند رفلکتور خود تشکیل فید جدیدی را می‌دهند که برای تابش به یک رفلکتور بزرگ از آن استفاده میشود. در اینجا نیز اصول یکسان است. در واقع هر رفلکتور باید جداگانه تحلیل شود تا پترن آن به دست آید و این پترن به عنوان پترن فید دیگری برای رفلکتور بزرگتر لحاظ شود. رفلکتورها از هر نوعی که باشند روش کار مشابه است. دومین موضوع محاسبه تفرق^۱ از لبه‌های رفلکتور می‌باشد. این

موضوع از آنجا بررسی نشد که اصولاً تفرق در فرکانس‌های پایین مخرب‌تر است. حال آنکه در فرکانس طراحی مورد نظر تائیری چندانی نخواهد داشت. به هر روی تفرق از لبه‌ها باعث افزایش دامنه گلبرگ فرعی دورتر و در پشت رفلکتور می‌شود.

مراجع

1. P. J. Wood, Reflector Antenna Analysis and Design, Peter Peregrinus Ltd., 1980.
2. Craig Scoot, Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design, Artech House, 1990.
3. B. S. Westcott, Shaped Reflector Antenna Design, Research Studies Press Ltd., 1983.
4. A. W. Love, Reflector Antenna, IEEE Inc., 1978.
5. Jacob W.M. Baars, The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication: Theory and Practice, Springer Science, 2007.
6. C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 2005.
7. P. J. B. Clarricoats, Y. Rahmat Samii and J. R. Wait, Microwave Horns and Feeds, IEE Inc. 1994.
8. Y. L. Lo and S. W. Lee, Antenna Handbook Volume II Ch. 15, Van Nostrand Reinhold, 1993.

